

насадок, насадок типа Каупера и Сименса; при внедрении компактных насадок расчетные формулы должны быть скорректированы.

Список использованных источников

1. Шкляр Ф. Р., Малкин В. М., Каштанова С. П., Калугин Я. П., Советкин В. Л. Доменные воздушнонагреватели (конструкции, теория, режимы работы). – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.
2. Торопов Е. В., Волкинд Д. К. Применение аппроксимаций для анализа эффективности регенеративного теплообмена // Теория и практика тепловых процессов в металлургии: сб. докладов Международной научно-практической конференции (18-21 сент. 2012 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 370–374.

УДК 669.051

С. С. Федоров, М. В. Губинский, С. Н. Форись

Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ НА ПРОВОДИМОСТЬ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

Аннотация

На основе совместного решения уравнений двухфазной модели кипящего слоя и потенциальной задачи проводимости однородных структур установлено влияние газовых пузырей на относительную электрическую проводимость слоя дисперсных частиц углеродных материалов. Предложены рекомендации по расчету удельного электрического сопротивления электротермического кипящего слоя.

Ключевые слова: углеродный материал, электротермическая печь, кипящий слой, электрическая проводимость, газовые пузыри.

Abstract

Joint solution of the equations of two-phase fluidized bed model and potential equation of homogeneous structures conductivity established the influence of gas bubbles on the relative electrical conductivity of the dispersed particles bed of carbon materials. Recommendations are proposed for the calculation of the electrical resistance of the electrothermal fluidized bed.

Keywords: carbon material, electrothermal furnace, fluidized bed, electrical conductivity, gas bubbles.

Конечные потребители углеродной продукции в цветной металлургии, приборо- и машиностроении предъявляют особые требования к химической чистоте и удельному электрическому сопротивлению (УЭС) изделий из графита. В условиях растущего спроса на графит и сопутствующих объемов углеродсодержащих отходов технология высокотемпературной переработки углеродного сырья в электротермических печах кипящего слоя (ЭТПКС) явля-

ется привлекательной и конкурентоспособной, так как позволяет получать графитированный материал высокого качества [1–8].

Основная проблема реализации данной технологии состоит в отсутствии надежных методик проектирования ЭТПКС, а также отечественного опыта эксплуатации подобных агрегатов. Несмотря на значительный вклад в исследования электротермического нагрева в кипящем слое, сделанный научными коллективами Института тепло- и массообмена Белоруссии, Института Газа Украины, зарубежных университетов McGill University и Iowa State University, вопросы понимания физики процесса остаются не до конца изученными. Что касается промышленного внедрения самой технологии электротермической переработки углеродных материалов в кипящем слое как самостоятельного процесса, то результаты носят локальный характер [1; 2] и требуют обобщения.

В последние несколько лет на кафедре промышленной теплоэнергетики Национальной металлургической академии Украины ведутся экспериментальные и теоретические исследования электротермической переработки углеродного сырья в кипящем слое [3–8]. Основными задачами этих работ являются разработка математических моделей, методик расчета и проектирования ЭТПКС, повышение энергетической эффективности процесса на основе использования ВЭР, а также создание технологической схемы всего комплекса по переработке углеродных материалов.

Ключевым параметром при расчете ЭТПКС является УЭС кипящего слоя, с которым напрямую связаны размеры рабочего пространства, температурный режим, мощность и производительность агрегата. Сложность задания сопротивления на начальном этапе проектирования состоит в том, что оно зависит от множества факторов. Среди них – свойства и фракционный состав материала, температура, плотность тока, состав печной атмосферы, характер псевдоожижения и структура слоя, а также размер, форма и ориентация электродов [9–11]. При этом, как известно, при физическом моделировании аппараты кипящего слоя плохо поддаются масштабированию [12]. Поэтому величины УЭС, полученные экспериментально в лабораторных условиях, являются лишь некоторыми реперными точками, которые могут коррелироваться, но при этом отличаться на больших промышленных объектах производительностью 0,5–2 т/ч. В этой связи, для оценки удельного электрического сопротивления кипящего слоя актуален вопрос построения адекватных математических моделей.

Целью данной работы явилось изучение влияния структуры кипящего слоя на его относительную электрическую проводимость, величину, обратную сопротивлению. Псевдоожиженные системы углеродных материалов можно отнести к группе В по классификации Гелдарта [13] – слои с образованием пузырей и малым расширением при переходе порога устойчивости. Поэтому анализ был проведен на основе двухфазной модели псевдоожижения [13], согласно которой система состоит из газовых пузырей и условно «плотной» (эмульсионной) фазы материала (рис. 1). Причем плотная фаза выступает в роли проводника электрической энергии, что позволяет представить неоднородный кипящий слой в виде изотропной структуры с объемными непроводящими включениями – газовыми пузырями [14–15].

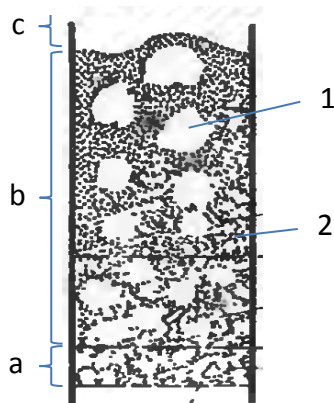


Рис. 1. Схема развития пузырей в кипящем слое

- 1 – газовые пузыри
- 2 – плотная фаза
- а – прирешетчатая зона
- б – основная зона пузырей
- с – надслоевое пространство

Подобная задача является предметом классической теории обобщенной проводимости, основные положения которой в свое время были развиты Максвеллом, Бургером, Эйкенем, Релеем и многими другими учеными [14–15]. При ее решении большую роль играет выбор элементарной ячейки изотропной структуры (рис. 2), обладающей свойствами системы в целом. В случае кипящего слоя этот выбор определяется частотой повторения газовых пузырей. При этом размеры элементарной ячейки могут быть соизмеримы с диаметром аппарата, что характерно для крупных пузырей в верхней части слоя, а также при переходе слоя в поршневой режим псевдоожижения.

В литературе [15] известны приближенные аналитические решения для относительной проводимости в случае упорядоченной кубической структуры (рис. 2) непроводящих включений (пузырей),

полученные при дроблении элементарной ячейки соответственно адиабатными (1) и изотермическими плоскостями (2):

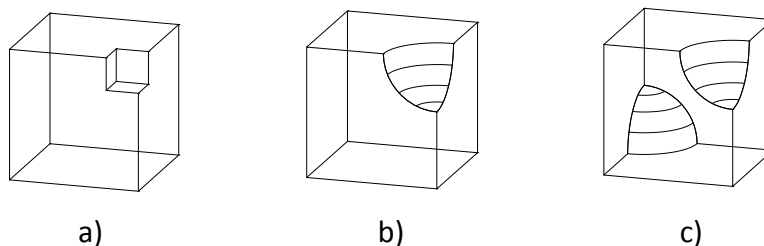


Рис. 2. Элементарные ячейки изотропных структур с объемными включениями

- а) включения в виде куба с кубической ориентацией
- б) включения в виде сферы с кубической ориентацией
- с) включения в виде сфер с ромбоэдрической ориентацией

$$\Lambda = 1 - \delta^{2/3}; \quad (1)$$

$$\Lambda = \frac{1 - \delta^{2/3}}{1 - \delta^{2/3} \cdot (1 - \delta^{1/3})}, \quad (2)$$

где Λ – относительная электрическая проводимость кипящего слоя, представляющая собой отношение проводимости кипящего слоя к проводимости «плотной» фазы материала; δ – объемная доля газовых пузырей.

В качестве элемента такой структуры рассматривались кубическая ячейка с включением аналогичной формы (рис. 2, а), имеющие общий центр и параллельные грани. Сравнительный анализ выражений (1)–(2) показывает, что расхождение результатов достигает 20%.

Выполненные авторами [15] численные исследования влияния формы непроводящих

включений показали, что переход от куба к пирамиде и сфере дает практически одинаковые результаты, отличающиеся в пределах погрешности вычислительного эксперимента, – 4 %.

Поскольку кипящий слой – это динамично изменяющаяся неоднородная система, то представляет интерес исследование влияния на относительную проводимость слоя не только формы, но также размеров и взаимной ориентации газовых пузырей. Для этого нами были проведены численные исследования на основе решения пространственной потенциальной задачи для двух видов изотропных структур: кубической и ромбоэдрической (рис. 2, 3). В отдельной серии расчетов принималось, что пузырьковая фаза состоит из равномерно распределенных газовых пузырей диаметром d_1 и d_2 соотношением диаметров 2:1.

Математическая постановка задачи включала в себя уравнение Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \bar{X}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \bar{Y}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \bar{Z}^2} = 0, \quad (4)$$

где $\bar{\varphi}$ – относительный потенциал физической величины; $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ – относительные пространственные координаты;

при граничных условиях

- на противоположных гранях источника потенциала:

$$\bar{\varphi} = 1 \text{ при } \bar{X} \in [0;1], \bar{Y} \in [0;1], \bar{Z} = 0; \quad (5)$$

$$\bar{\varphi} = 0 \text{ при } \bar{X} \in [0;1], \bar{Y} \in [0;1], \bar{Z} = 1; \quad (6)$$

- на боковых гранях и на поверхности непроводящих включений при

$$\bar{X} \in [0;1], \bar{Y} = 0, \bar{Z} \in [0;1]; \bar{X} \in [0;1], \bar{Y} = 1, \bar{Z} \in [0;1]; \bar{X} = 0, \bar{Y} \in [0;1], \bar{Z} \in [0;1];$$

$$\bar{X} = 1, \bar{Y} \in [0;1], \bar{Z} \in [0;1]$$

$$\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \bar{N}} = 0, \quad (7)$$

где \bar{N} – нормаль к поверхности.

Задача (4–7) была решена методом конечных разностей при относительном шаге разбиения элементарной ячейки $\Delta \bar{N} = 0,05$. Критерием сходимости являлся баланс потенциалов на гранях:

$$\sum \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \bar{Z}} \Big|_{\bar{Z}=0} = \sum \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \bar{Z}} \Big|_{\bar{Z}=1}. \quad (8)$$

Выбор диапазона исследований основывался на совместном анализе

выражений для порозности неоднородного кипящего слоя (9) [12] и двухфазной системы газ-газовые пузыри-эмульсия (10) [13] с учетом физических свойств графита ($\rho = 2050 \text{ кг/м}^3$, $d_q = 0,1\text{--}2,0 \text{ мм}$), гидродинамических режимов и геометрии ЭТПКС [1–8]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{mf} \cdot \left(\frac{Re + 0,02 \cdot Re^2}{Re_{mf} + 0,02 \cdot Re_{mf}^2} \right)^{0,1}; \quad (9)$$

$$\varepsilon = \delta + (1 - \delta) \cdot \varepsilon_{mf}, \quad (10)$$

где ε – порозность неоднородного кипящего слоя; $\varepsilon_{mf} = 0,4\text{--}0,45$ – порозность плотного слоя при переходе порога устойчивости; Re, Re_{mf} – критерий Рейнольдса, соответственно кипящего слоя и при переходе порога устойчивости.

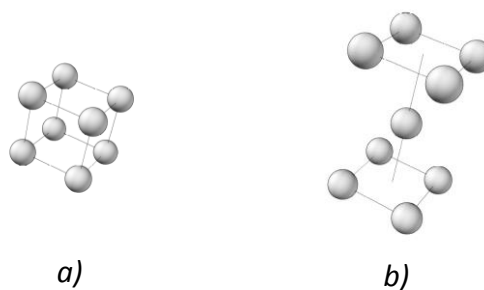


Рис. 3. Варианты расположения замкнутых непроводящих включений в изотропной среде:

a) – кубическая структура;

b) – ромбоэдрическая структура

Исследования проведены в интервале $\delta = 0\text{--}30\%$.

Результаты проведенных исследований представлены на рис. 4. При этом относительная проводимость по итогам численного моделирования находится в некоторой промежуточной области между данными расчетов по зависимостям (1) и (2) и согласуются с формулой В.И. Оделевского [15]:

$$\Lambda = \frac{2 \cdot (1 - \delta)}{2 + \delta} \quad (11)$$

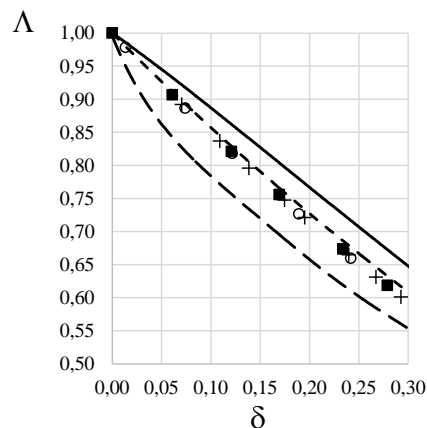


Рис. 4. Зависимость относительной проводимости изотропной структуры от объемной доли замкнутых включений

- — — - аналитическая зависимость (1)
- - аналитическая зависимость (2)
- - - - - формула В.И. Оделевского (3)
- - численное решение (4-7) при кубической структуре включений из сфер одинакового диаметра
- - численное решение (4-7) при ромбоэдрической структуре включений из сфер одинакового диаметра
- +
- численное решение (4-7) при ромбоэдрической структуре включений из сфер с соотношением диаметров 2:1

Как видно из рис. 4, функциональная связь $\Lambda(\delta)$ в рассмотренном диапазоне близка к линейному виду. Увеличение объемной доли пузырей сопровождается снижением проводимости на 41 %, что эквивалентно росту сопротивления слоя на 70 % по отношению к «плотной» фазе. Однако при $\delta = 2\text{--}5\%$, что отвечает реальной структуре пузырькового кипящего слоя, относительная проводимость Λ составляет всего 0,96–0,92. Таким образом, вклад газовых пузырей в снижение проводимости незначительный. Это подтверждается экспериментальными данными, согласно которым с увеличением числа псевдоожижения объемная доля пузырей и УЭС пузырькового слоя практически не меняются [9–10]. Отсюда следует, что основной прирост сопротивления (в 2–5 раз [9–10]) при переходе из плотного слоя в кипящий обусловлен ухудшением контактного взаимодействия частиц эмульсионной фазы как между собой, так и с электродами.

Изменение взаимной ориентации газовых пузырей (переход от кубической структуры к ромбоэдрической, рис. 3), а также вариация диаметра неоднородных включений не меняет качественной картины. Это формально позволяет при расчете УЭС кипящего слоя ограничи-

ваться объемной долей пузырей, принимая постоянными их размеры и изотропную структуру распределения. Для дальнейшего использования расчетные данные (4–8, рис. 4) были аппроксимированы линейной регрессионной зависимостью с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,99$:

$$\Lambda = 0,99 - 1,34 \cdot \delta \quad (12)$$

Выражение (11) можно рекомендовать для оценки относительной электрической проводимости кипящего слоя. Вместе с тем рост и коалесценция пузырей по высоте сопровождается увеличением их диаметра, уменьшением общего количества и частоты. Верхняя часть слоя может иметь выраженную неоднородность, когда через горизонт проходят одиночные пузыри, соизмеримые с размерами аппарата. На рис. 5 сопоставлена относительная проводимость слоя при равномерном (изотропном) распределении пузырей (12) и в случае одиночного пузыря, соответствующего максимальной неоднородности слоя. При $\delta = 2\text{--}5\%$ относительная проводимость слоя с одиночным пузырем составляет 0,98–0,95.

Таким образом, для пузырькового режима псевдоожижения углеродных материалов при $\delta = 2\text{--}5\%$ снижение проводимости слоя по отношению к «плотной» фазе находится в пределах 0,92–0,98, что отвечает увеличению УЭС на 2–9 %.

В заключение необходимо отметить некоторые особенности псевдоожижения, которые ограничивают так называемую активную электропроводящую область. Прирешетчатая зона формирования пузырей (рис. 1) имеет сравнительно высокую порозность и однородность дисперсной фазы, в результате чего сопротивление здесь может быть на несколько порядков выше. То же самое относится к горизонту формирования поршней при больших числах псевдоожижения ($W \geq 1,5\text{--}2$), а также надслоевому пространству, где отсутствует непрерывная эмульсионная фаза. Эти особенности должны обязательно учитываться в расчете ЭТПКС.

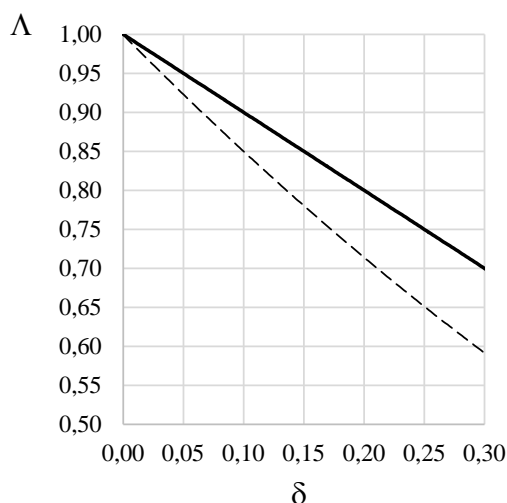


Рис. 5. Зависимость относительной проводимости от распределения газовых пузырей
 - - - - однородная группа пузырей (12)
 ———— одиночный пузырь

Выводы

На основе двухфазной модели псевдоожиженного слоя частиц углеродных материалов установлено, что при равномерном распределении газовых пузырей и их объемной доли $\delta =$

2–5 % относительная электрическая проводимость слоя составляет $\Lambda = 0,96–0,92$. В случае одиночного пузыря, соответствующего максимальной неоднородности кипящего слоя, относительная проводимость в указанном диапазоне равна 0,98–0,95. Таким образом, вклад газовых пузырей в снижение проводимости незначительный. Основной прирост сопротивления (в 2–5 раз) при переходе из плотного слоя в кипящий обусловлен ухудшением контактного взаимодействия частиц эмульсионной фазы как между собой, так и с электродами.

Изменение размера и взаимного расположения пузырей относительно друг друга практически не влияют на электрическую проводимость слоя.

На основе численного решения потенциальной задачи проводимости изотропных структур получена регрессионная зависимость проводимости слоя от объемной доли пузырей $\Lambda = 0,99 - 1,34 \cdot \delta$ с достоверностью аппроксимации $R^2 > 0,99$, которая может быть использована при моделировании УЭС пузырькового кипящего слоя с равномерно распределенными пузырями.

Список использованных источников

1. EUROPEAN PATENT APPLICATION №87300021.0, Int. Cl.4 C01B 31/4, B01J 8/24. Thermal purification of natural mineral carbons / Goldberger W.M., Carney P.R., Reed A.K.; Applicant: SUPERIOR GRAPHITE CO. EP 0 274 165 A1; Date of filing: 05.01.1987; Date of publication: 13.07.1988 // Bulletin 1988/28. – 15p.
2. United States Patent Application Publication №811,392, Int. Cl.2B01J 8/24; H05B 3/62. Electrothermal fluidized bed furnace / Hirichi Ishizuka, Yoshiaki Sugano. Applicant: Hirichi Ishizuka; Date of filing: Jun. 29, 1977; Date of publication: Jun. 19, 1979. – 8 p.
3. Губинский М. В., Федоров С. С., Ливитан Н. В., Гогоци А. Г., Igor Barsukov, Upendra Rohatgi. Анализ энергетической эффективности работы печей для высокотемпературной термической обработки углеродных материалов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2013. №2. С. 88–91.
4. Губинский М. В., Федоров С. С., Ливитан Н. В., Барсуков И. В., Гогоци А. Г., Бродниковский Н. П. Печи для производства высокочистых углеродных материалов // *Сборник докладов международной научно-практической конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии»* (18–21 сентября 2012 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 79–83.
5. Gubynskyi M. V., Fedorov S. S., Livitan M. V., Barsukov I. V., Gogotsi O. G., Upendra Rohatgi. Electrothermal fluidized bed furnace for thermal treatment of recycled battery wastes / *Proceedings of The Fluids Engineering Division summer meeting FEDSM2013* (July 17-11, 2013). Incline Village, Nevada, USA.
6. Губинский М. В., Федоров С. С., Ливитан Н. В., Хейфец Р. Г. Выбор аэродинамических режимов работы высокотемпературных печей электротермического кипящего слоя / *Сборник трудов Национальной металлургической академии Украины, «Металлургическая теплотехника»* – Выпуск 4 (19). – Днепропетровск: «Новая идеология», 2012. С. 55-61.
7. Федоров С. С. Анализ эффективности применения высокотемпературных секционных утилизаторов теплоты с кипящим слоем. Результаты исследований. Часть I // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 3. – С. 125–128.

8. Федоров С. С. Анализ эффективности применения высокотемпературных секционных утилизаторов теплоты с кипящим слоем. Результаты исследований. Часть II // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 4. – С. 107–109.
9. Бородуля В. А. Высокотемпературные процессы в электротермическом кипящем слое. – Минск: Наука и техника, 1973. – 173 с.
10. Кожан А. П., Махорин К. Е., Гориславец С. П. Электросопротивление кипящего слоя графитовых частиц // ИФЖ, Том 15, №4. – 1968), С. 648–652.
11. Малиновский А. И., Рабинович О. С., Бородуля В. А., Гребеньков А. Ж., Сидорович А. М. Тепло- и массоперенос в дисперсных средах // ИФЖ. 2012. Т. 85. № 2. С. 239–245.
12. Тодес О. М., Цитович О. Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы. – Л.: Химия, 1981. – 296 с.
13. Prabir Basu. Combustion and Gasification in Fluidized Beds. – Boca Raton: CRC / Taylor & Francis, 2006. – 470 p.
14. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 1962. – 456 с.
15. Дульнев Г. Н., Новиков В. В. Процессы переноса в неоднородных средах. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 248 с.

УДК 669.042

С. В. Филатов *, **С. А. Загайнов ****, **В. В. Филиппов *****, **О. Н. Собянина ****

* ОАО «НЛМК», г. Липецк, Россия,

** ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия,

*** ОАО «ЕВРАЗ НТМК», г. Нижний Тагил, Россия

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ, ВЫПЛАВЛЯЮЩИХ ЧУГУН ИЗ ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩИХ ТИТАНОМАГНЕТИТОВ ЗА СЧЕТ ОБОГАЩЕНИЯ ДУТЬЯ КИСЛОРОДОМ

Аннотация

Показана теоретически и подтверждается промышленными данными принципиальная возможность повышения интенсивности работы доменных печей, выплавляющих чугун из ванадийсодержащих титаномagnetитов за счет повышения содержания кислорода в дутье.

Константа равновесия, титан, карбид титана, обогащение дутья кислородом, производительность, удельный расход кокса.